Anejo. Cálculos hidráulicos

Introducción

El comportamiento del colector como reactor biológico presenta innumerables variables. Algunas de estas variables, principalmente las relacionadas con la cinética microbiana y los fenómenos de difusión, resultan de difícil consideración, más aún cuando el régimen de funcionamiento hidráulico no tiene un patrón estable. La mayor parte de los estudios consultados, particularmente aquéllos realizados en sistemas a escala (Nielsen y Hvitved-Jacobsen, 1988; Kitagawa *et al.*, 1988; Tanaka y Hvitved-Jacobsen, 2000), parten de datos experimentales extraídos de sistemas hidráulicos operando en condiciones estacionarias.

Puesto que las situaciones transitorias en mecanismos complejos del tipo del estudiado presentan grandes problemas a la modelización, se ha tratado de caracterizar el comportamiento hidráulico del Interceptor General de Castelldefels bajo hipótesis de régimen permanente y basándose en la representatividad de sus parámetros medios.

Objeto del anejo

Los parámetros hidráulicos a considerar en este anejo son: velocidad media del flujo, tiempo de permanencia hidráulica, radio hidráulico, calado medio hidráulico y, genéricamente, la geometría de las secciones mojada y seca de la conducción en sus tramos por impulsión y por gravedad.

Método

Se considera patrón de funcionamiento hidráulico del sistema la curva de caudales suministrada en el apartado 4.2 (figuras 4.3 y 4.4). Robert Brown (2001, 14 de mayo) sostiene que el funcionamiento del Interceptor General de Castelldefels presenta un alto grado de estabilidad, lo que le confiere una modulación uniforme en el tiempo. Atendiendo a sus recomendaciones, se desprecian las posibles variaciones en la curva de caudales medios asociadas al periodo semanal y a los ciclos estacionales. Además, de lo apuntado por Robert Brown se desprende que la media de los caudales medios horarios durante el ciclo diario es representativa del comportamiento hidráulico global del sistema, independientemente de los caudales punta y valle que se producen de forma inequívoca.

El cálculo hidráulico de las diferentes secciones se desarrolla a partir de la media de los caudales medios horarios bajo hipótesis de régimen permanente. De este modo, suponiendo que el agua residual es un fluido incompresible, se puede concluir que tanto la velocidad de flujo como el caudal pueden considerarse constantes a lo largo de cada uno de los tramos de conducción.

Además, no se somete a consideración la transición del régimen forzado al régimen en lámina libre. En la práctica, se supone que la transición entre regímenes tiene lugar exclusivamente en el interior de la cámara de descarga, de modo que las longitudes de trabajo en cada tramo son las que aparecen detalladas en la tabla 4.1 del documento.

Resultados

Tramo de conducción por impulsión

La velocidad media del flujo de agua en el tramo de conducción por impulsión se deduce a partir de la media de los caudales medios horarios como:

$$u_1 = \frac{Q_{m,h}}{A_1} = \frac{500\ m^3/h}{0,25 \times \pi \times 0,70^2\ m^2} \times \frac{1\ h}{3.600\ s} = 0,36\ m/s \qquad \text{[A-1]}$$

donde u_1 es la velocidad media del flujo de agua residual y A_1 es la sección de la conducción. Para esta velocidad de circulación el tiempo de permanencia del fluido en la conducción (t_1) se calcula como:

$$t_1 = \frac{L_1}{u_1} = \frac{3.600\ m}{0,36\ m/s} \times \frac{1\ h}{3.600\ s} = 2,8\ h \qquad \text{[A-2]}$$

donde L_1 es la longitud total del tramo por impulsión.

Dado que la conducción trabaja constantemente a sección llena, el único parámetro geométrico característico de la sección que resulta de utilidad en el contexto de este estudio es el radio hidráulico. Su valor calculado a partir del diámetro de la sección (D_1) es:

$$R_1 = \frac{D_1}{4} = \frac{0,70\ m}{4} = 0,18\ m \qquad \text{[A-3]}$$

El conjunto de todos los parámetros geométricos e hidráulicos asociados a la sección del tramo de conducción en régimen forzado aparece detallado en la tabla A.1.

Tabla A.1. *Parámetros geométricos e hidráulicos característicos del tramo de conducción por impulsión del Interceptor General de Castelldefels.*

Parámetro	Notación	Valor
Flujo:		
Caudal medio horario, m^3/h	$Q_{m,h}$	500
Velocidad media, m/s	u_1	0,36
Tiempo de permanencia hidráulica, h	t_1	2,8
Sección:		
Sección mojada, m^2	A_1	0,38
Radio hidráulico, m	R_1	0,18

Tramo de conducción por gravedad

En el estudio detallado de este tramo de conducción se ha recurrido a la formulación de Prandtl-Colebrook (ecuación A-4) que se desprende de las expresiones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White.

$$u = -2\log\left(\frac{k}{3{,}71\cdot D} + \frac{2{,}51\cdot \nu}{D\cdot\sqrt{2g\cdot J\cdot D}}\right)\cdot\sqrt{2g\cdot J\cdot D} \qquad \text{[A-4]}$$

Para el parámetro *k* relativo a la rugosidad absoluta de la conducción se adopta el valor de 1,2 mm de acuerdo a la clasificación de Hernández (1990) para conducciones de hormigón liso de calidad media o moderadamente rugoso. Se ha decidido no penalizar excesivamente los efectos derivados del envejecimiento como proponen Chadwick y Morfett (1986) adoptando un valor de 6,0 mm, ni realizar una estimación demasiado optimista como el valor de 0,25 mm que hace URALITA (1998) para sus conducciones.

El parámetro ν de viscosidad cinemática del fluido en el caso de las aguas residuales es una medida indirecta. Resulta recurrente en gran cantidad de fuentes (Imhoff, 1969; *Manual Técnico del Agua*, 1979; Hernández, 1990; URALITA, 1998) la asignación a este parámetro del valor $1{,}31\times10^{-6}$ m^2/s.

La aplicación de la fórmula A-4 con los datos del sistema Interceptor General de Castelldefels permite obtener la velocidad media del flujo de agua residual y el caudal transportado, ambos a sección llena, como:

$$u = -2\log\left(\frac{0{,}0012}{3{,}71\cdot 1{,}0} + \frac{2{,}51\cdot 1{,}31\times10^{-6}}{1{,}0\cdot\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 0{,}0008\cdot 1{,}0}}\right)\cdot\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 0{,}0008\cdot 1{,}0} = 0{,}866\ m/s \qquad \text{[A-5]}$$

$$Q = u\cdot A_2 = \left(0{,}866\ m/s\right)\cdot\left(0{,}25\cdot\pi\cdot 1{,}0^2\ m^2\right)\cdot\frac{3.600\ s}{1\ h} = 2.450\ m^3/h \qquad \text{[A-6]}$$

Para poder obtener la velocidad media del flujo de agua cuando se transporta el caudal real ($Q_{m,h}$) y, por consiguiente, cuando la altura de llenado es inferior al diámetro, se puede hacer uso de los coeficientes correctores de Thormann-Franke (Hernández, 1990) o, alternativamente, de las tablas o ábacos donde se proporcionan las correspondientes variaciones de caudal y velocidad de flujo en función de la altura de llenado (Imhoff, 1969; URALITA, 1998).

Para la razón entre el caudal real y el caudal a sección llena desde URALITA (1998) se proporcionan las relaciones:

$$\frac{Q_{m,h}}{Q} = \frac{500}{2.450} = 0{,}204 \Rightarrow \frac{y}{D} = 0{,}304\ ; \quad \frac{u_2}{u} = 0{,}795 \qquad \text{[A-7]}$$

que conducen a la determinación del calado medio (*y*) en 0,30 m y la velocidad media del flujo (u_2) en 0,69 m/s. Para esta velocidad de circulación el tiempo de permanencia del fluido en la conducción por gravedad (t_2) se calcula como:

$$t_2 = \frac{L_2}{u_2} = \frac{2.500\ m}{0{,}69\ m/s}\cdot\frac{1\ h}{3.600\ s} = 1{,}0\ h \qquad \text{[A-8]}$$

Conociendo el valor del calado medio, los parámetros relativos a la sección hidráulica se calculan de acuerdo a las relaciones geométricas representadas en la figura A.1.

$$\beta = 2 \cdot \arccos\left(\frac{D}{D-2y}\right)$$

$$b = D \cdot \sin\left(\beta/2\right)$$

$$A_w = \frac{1}{8} \cdot D^2 \cdot \left(\beta - \sin\beta\right); \quad p_w = \beta \cdot D/2$$

$$A' = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - A_w; \quad p' = \left(2\pi - \beta\right) \cdot D/2$$

$$R = \frac{A_w}{p_w}; \quad d_m = \frac{A_w}{b}$$

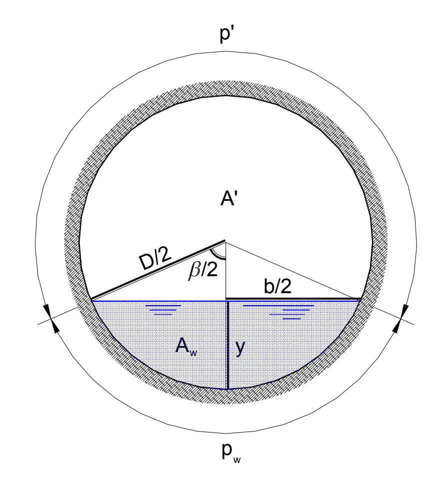


Figura A.1. *Parámetros geométricos característicos en una sección circular parcialmente llena.*

El conjunto de todos los parámetros geométricos e hidráulicos que describen el tramo de conducción por gravedad de acuerdo al régimen en lámina libre aparece detallado en la tabla A.2.

Tabla A.2. *Parámetros geométricos e hidráulicos característicos de la sección en el tramo por gravedad (en lámina libre) del Interceptor General de Castelldefels.*

Parámetro	Notación	Valor
Flujo:		
Caudal medio horario, m^3/h	$Q_{m,h}$	500
Velocidad media, m/s	u_2	0,69
Tiempo de permanencia hidráulica, h	t_2	1,0
Sección:		
Sección, m^2	A_2	0,76
Calado, m	y	0,30
Ancho de lámina, m	b	0,92
Sección mojada, m^2	A_w	0,20
Perímetro mojado, m	p_w	1,2
Sección seca, m^2	A'	0,58
Perímetro seco, m	p'	1,2
Radio hidráulico, m	R_2	0,17
Calado medio hidráulico, m	d_m	0,22

Referencias

Chadwick, A.J. y Morfett, J.C. (1986). *Hydraulics in civil engineering*, Allen & Unwin (Publishers), Ltd., London.

Hernández, A. (1990). *Vertidos de aguas residuales. Saneamiento y alcantarillado*, 2ª ed., Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

Imhoff, K. (1969). *Manual de saneamiento de poblaciones*, 1ª ed. española de *Taschenbuch der stadtentwässerung*, 22ª ed, München, 1969.

Manual Técnico del Agua (1979). Degrémont, 4ª ed. española, Rueil-Malmaison CEDEX.

URALITA (1998). *Manual general URALITA. Obra civil*, vol. 2, 2ª ed, Paraninfo-ITP Co., Madrid.